

(19) BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

(12) Offenlegungsschrift  
(10) DE 44 22 743 A 1

(51) Int. Cl. 6:  
F 04 B 43/04  
H 01 L 21/306  
H 01 L 21/58

DE 44 22 743 A 1

(21) Aktenzeichen: P 44 22 743,4  
(22) Anmeldetag: 29. 6. 94  
(43) Offenlegungstag: 4. 1. 96

(71) Anmelder:  
Gerlach, Torsten, 98693 Ilmenau, DE

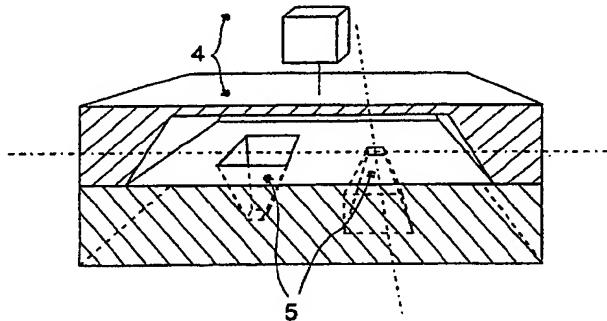
(72) Erfinder:  
gleich Anmelder

(54) Mikropumpe

(55) Bekannte Mikropumpen sind durch einen relativ komplizierten Aufbau gekennzeichnet, der im allgemeinen einen hohen Fertigungs- und Montageaufwand erfordert. Außerdem sind die erreichbaren Förderleistungen begrenzt. Die neue Mikropumpe soll demgegenüber einen für die Serienfertigung günstigeren einfachen Aufbau haben und durch bessere dynamische Eigenschaften höhere Pumpraten ermöglichen.

Zur Gleichrichtung der durch eine schwingende Antriebsvorrichtung (4) erzeugten alternierenden Strömung kommen mindestens zwei dynamische Mikroventile (5) zum Einsatz. Diese bestehen im wesentlichen aus einem Mikrokanal, dessen Querschnitt sich in einer Strömungsrichtung kontinuierlich bis zur engsten Stelle verringert. Bewegliche mechanische Teile sind nicht notwendig, so daß die dynamischen Mikroventile auf einfachste Weise zum Beispiel in Silizium herstellbar sind. Das einfache hydraulische System der Mikropumpe erlaubt hohe Arbeitsfrequenzen und damit Pumpleistungen.

Einsatz vor allem in der Mikrosystemtechnik, zum Beispiel als Antriebselement in mikrohydraulischen oder -pneumatischen Systemen.



DE 44 22 743 A 1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen  
BUNDESDRUCKEREI 11. 95 508 061/458

## Beschreibung

Die Erfindung betrifft eine Mikropumpe.

Die Mikropumpe hat dynamische passive Ventile und dient besonders zur Förderung von Gasen und Flüssigkeiten. Sie ist sehr vorteilhaft mit bekannten Halbleitertechnologien herstellbar und für den Einsatz in integrierten Mikrosystemen geeignet.

## Stand der Technik

Aus der NL-PS 8302860 ist bereits eine Mikropumpe auf Siliziumbasis bekannt die im wesentlichen aus drei identischen piezoelektrisch angetriebenen Ventilelementen, welche strömungstechnisch in Reihe angeordnet sind, besteht. Beim Öffnen und Schließen dieser aktiven Ventile, verrichtet die sich durchbiegende Membran Volumenarbeit und erzeugt einen entsprechenden Druck auf das Fluid. Werden die einzelnen Ventile in einem geeigneten Dreiphasentakt angesteuert, so erfährt das Fluid eine Beförderung in eine bestimmte Richtung, die durch die peristaltische Welle bestimmt ist.

Eine andere Mikropumpe, ebenfalls für die Systemintegration geeignet, wird in der CH-PS 04055189 vorgestellt. Sie enthält eine piezoelektrisch angetriebene Membran, welche das zu fördernde Fluid periodisch unter Druck setzt. Zwei passive Mikroventile am Ein- bzw. Ausgang der Pumpe richten diesen Wechseldruck gleich und legen damit die Strömungsrichtung fest. Das Arbeitsprinzip entspricht strukturell der klassischen Kolbenpumpe.

Beiden beschriebenen Mikropumpen ist der relativ komplizierte mechanische Aufbau gemein, der den Einsatz der Mikrotechnologien erschwert und die Herstellungskosten erhöht. Insbesondere ist ein stark strukturiertes hydraulisches Leitungssystem durch Mehrfach-Lithographie, verbunden mit einer entsprechenden Anzahl von Ätzprozessen, zu realisieren. Außerdem ist das Fügen der verschiedenen Schichten zu einem Sandwich mit einigen technologischen Schwierigkeiten verbunden. Schließlich nehmen die Mikropumpen, bedingt durch das Funktionsprinzip, eine relativ große Fläche auf dem Trägersubstrat ein. Dem stehen zwar die hohe Dosiergenauigkeit und ein relativ hoher Pumpdruck, jedoch auch eine vergleichsweise geringe Förderleistung gegenüber, welche unter anderem durch die hohen Strömungswiderstände zu erklären ist und die im Zusammenhang mit den relativ großen Totvolumina zu recht beachtlichen Passierzeiten der durchströmenden Fluide führt.

Aus der DE-PS 42 23 019 ist eine ventillose Mikropumpe bekannt, die durch eine Aktorvorrichtung, im allgemeinen eine schwingende Membran, ebenfalls eine periodische Druckeinprägung auf das strömende Medium bewirkt. Jedoch erfolgt die Gleichrichtung partiell durch eine in strömungstechnischer Hinsicht anisotrope Struktur ohne jegliche bewegte mechanische Funktionselemente. Als anisotrope Struktur wird unter anderem ein ansonsten nicht näher bezeichneter spaltartiger Bereich genannt, der sägezahnartig ausgeführt ist. Deshalb Herstellung mit den Mikrotechnologien gestaltet sich jedoch kompliziert, da die Sägezahnform nicht zwangsläufig mit der Kristallstruktur des Substratmaterials zusammenfallen muß und sich dadurch der Einsatz anisotroper Ätzverfahren erschwert. Das vorgeschlagene Ausführungsbeispiel, dessen sägezahnartige Geometrie durch die Anordnung zweier V-förmiger spaltarti-

ger Strukturen hintereinander realisiert ist, erfordert bei den angegebenen Abmessungen im Mikrometerbereich jedoch kostspielige Präzisionsfügeverfahren.

## Vorteile der Erfindung

Die erfindungsgemäße Mikropumpe entsprechend Anspruch 1 hat gegenüber den soeben gewürdigten Anordnungen den Vorteil einer sehr einfachen geometrischen Struktur, die durch wenige mikrotechnologische Verfahren unkompliziert herstellbar ist. Die notwendigen Fügeschritte sind dabei nach Anzahl und erforderlicher Genauigkeit auf ein Minimum reduzierbar. Dadurch ist die Mikropumpe für die preiswerte Massenherstellung besonders geeignet. Vor allem gegenüber den beiden zuerst gewürdigten Schriften ist der Platzbedarf der erfindungsgemäßen Mikropumpe deutlich verringert.

Andererseits bewirkt die einfache Geometrie der erfindungsgemäßen Mikropumpe eine Optimierung des fluidodynamischen Systems, wodurch sich die maximal mögliche Arbeitsfrequenz, Volumenstrom und Pumpendruck erhöhen.

Eine besonders vorteilhafte Ausbildung der Mikropumpe sieht wenigstens zwei dynamische passive Mikroventile vor, welche aus einem Mikroströmungskanal mit pyramidenstumpfförmiger Geometrie bestehen. Damit verringert sich der Kanalquerschnitt entlang der Symmetriearchse in der einen Richtung kontinuierlich bis zu seiner engsten Stelle, um sich dann plötzlich zu erweitern. Diese Form des Mikroströmungskanals bewirkt, daß sein Strömungswiderstand bei genügend hohen Strömungsgeschwindigkeiten von der Strömungsrichtung abhängt.

Der beschriebene Mikrokanal ist demzufolge in der Lage, eine alternierende Strömung nach dem Prinzip "zwei Schritte vorwärts -- einen Schritt zurück" partiell gleichzurichten, wodurch ein Nettovolumenstrom in einer bevorzugten Strömungsrichtung bewirkt wird. Da dieser Effekt nur bei höheren Geschwindigkeiten auftritt wird er als dynamisches Mikroventil bezeichnet.

Derartige dynamische Mikroventile sind in einer Mikropumpe gemäß Patentanspruch 1 eingesetzt.

## Zeichnung

Ausführungsbeispiele der Erfindung sind in der Zeichnung dargestellt und in der nachfolgenden Beschreibung näher erläutert.

## Es zeigen

Fig. 1 eine Perspektivdarstellung eines ersten Ausführungsbeispiels einer Mikropumpe, Fig. 2 einen Schnitt entlang der Linie 1-1 in Fig. 1, Fig. 3 einen Schnitt entlang der Linie 2-2 in Fig. 1 sowie Fig. 4 bis Fig. 7 ein zweites bis fünftes Ausführungsbeispiel einer Mikropumpe.

## Beschreibung der Ausführungsbeispiele

Die erfindungsgemäße Mikropumpe besteht aus einer im wesentlichen geschlossenen Pumpkammer 3, die mit dem zu fördernden Fluid gefüllt ist und welcher durch eine geeignete Antriebsvorrichtung 4 eine periodische Druck- und Volumenänderung aufgeprägt wird. Weiterhin enthält die Mikropumpe mindestens zwei der beschriebenen dynamischen Mikroventile 5, die in Form von Strömungskanälen als Ein- bzw. als Auslaßöffnung der Pumpkammer 3 dienen.

Die Mikropumpe zeichnet sich insbesondere durch ihren sehr einfachen Aufbau aus, der sich zum Beispiel sehr vorteilhaft mit allgemein bekannten Mikrotechnologien wie Photolithographie und anisotropes Ätzen auf der Basis von Silizium und Glas herstellen läßt.

So können die dynamischen Mikroventile 5 in einem <100>-orientierten Siliziumwafer dergestalt realisiert werden, daß, ausgehend von einer genügend großen Öffnung in der Ätzmaske, der Materialabtrag mittels eines anisotropen Ätzlösungen wie KOH über die vollständige Waferdicke voranschreitet. Der dabei entstehende Kanal wird seitlich durch vier kristallographische <111>-Flächen begrenzt, wodurch sich seine pyramidenstumpfförmige Geometrie ergibt. Die jeweils gegenüberliegenden <111>-Flächen schließen hierbei einen Winkel von etwa 70° ein. Eine Linie 14, welche in der Mitte in Hauptströmungsrichtung verläuft, stellt die Symmetriechse des dynamischen Mikroventils 5 dar. Sie steht senkrecht auf der Waferoberfläche. Durch Anwendung der Doppelseitenlithographie auf einem zweiseitig polierten Wafer 6 können die für den Ein- bzw. Auslaß bestimmten dynamischen Mikroventile 5 in einer antiparallelen Anordnung auf einem gemeinsamen Substrat in einem Technologiegang hergestellt werden.

Für die Antriebsvorrichtung 4 ist vor allem eine Membran 7 geeignet, die elektromagnetisch, elektrostatisch, pneumatisch oder piezoelektrisch angeregt wird und mit dem Doppelpfeil 16 bezeichnete Biegeschwingungen ausführt. Der piezoelektrische Antrieb kann günstigerweise durch einen Bimorph erfolgen.

Die Pumpkammer 3 ist durch geeignete Mikrotechnologien in einem Element 10 11, 11a bzw. 11b und 11c festgelegt. Dies kann beispielsweise durch Photolithographie mit einem anschließenden Ätzschritt in Silizium oder Glas als Ausgangsmaterial geschehen. Bei Verwendung eines entsprechenden Ätzstopverfahrens kann der Materialabtrag vor der vollständigen Durchdringung des Elementes 10 abgebrochen werden, wodurch die Membran 7 der Antriebsvorrichtung 4 entsteht. Als ein solcher Ätzstop sollen auch spezielle, auf dem Ausgangsmaterial des Elementes 10 vorher aufgebrachte Schichten, wie zum Beispiel Siliziumoxid oder Siliziumnitrid auf einem Siliziumträger, verstanden werden, an denen der Ätzvorgang zum Erliegen kommt und die durch den Materialabtrag freigelegt werden und damit die Membran 7 festlegen.

Die Pumpkammer 3 ist auf einer der Antriebsvorrichtung 4 abgewandten Seite 12 durch den Wafer 6, welcher die dynamischen Mikroventile 5 enthält und der mit dem Element 10, 11, 11a bzw. 11c verbunden ist, geschlossen.

Das die Pumpkammer 3 enthaltende Element 11, 11a bzw. 11b und 11c kann auf einer dem Wafer 6 abgewandten Seite 13 an sich offen sein, realisiert zum Beispiel durch einen das Element 11, 11a bzw. 11b und 11c vollständig durchlaufenden Ätzschritt. Die Membran 7 wird dann als dünnes Material oder Folie 15 mit geeigneten Fügeverfahren auf dem Element 11, 11a bzw. 11b befestigt, wodurch die Pumpkammer 3 geschlossen wird. Das ist zum Beispiel möglich, indem eine Glasfolie, welche die Membran 7 bildet, durch anodisches Bonden auf dem Element 11, 11a bzw. 11b aufgebracht wird.

Typische Abmessungen der erfundungsgemäßen dynamischen Mikropumpe betragen für:  
den Querschnitt der dynamischen Mikroventile 5 an der engsten Stelle zwischen einem Mikrometer und fünfhundert Mikrometer,  
die Ausdehnung der dynamischen Mikroventile 5 ent-

lang der Symmetriechachsen 14 zwischen zehn Mikrometer und einem Millimeter,  
die Dicke der Membran 7 zwischen einem Mikrometer und einem Millimeter,  
die Ausdehnung der Membranfläche zwischen fünfhundert Mikrometer und zwanzig Millimeter und  
die Pumpkammerhöhe senkrecht zu dem Wafer 6 zwischen zehn Mikrometer und fünf Millimeter.

Die typische Schwingfrequenz der Membran 7 liegt zwischen einhundert Hertz und zwanzig Kilohertz.

Die Fig. 1 bis Fig. 3 zeigen ein erstes Ausführungsbeispiel.

Die dynamischen Mikroventile 5 sind in einer antiparallelen Anordnung in dem zweiseitig polierten Silizium-Wafer 6 realisiert. Das Element 10, welches auf der der Membran 7 abgewandten Seite 12 fest mit dem Wafer 6 verbunden ist, enthält die Pumpkammer 3, die durch einen anisotropen Ätzschritt erzeugt wird und eine pyramidenstumpfförmige Geometrie aufweist. Durch ein Ätzstopverfahren bleibt ein dünner Materialrest auf einer den dynamischen Mikroventilen 5 abgewandten Seite der Pumpkammer 3 stehen, der die Membran 7 bildet. Die Membran 7, welche Bestandteil der ansonsten nicht näher bezeichneten Antriebsvorrichtung 4 ist, führt mit dem Doppelpfeil 16 gekennzeichnete Biegeschwingungen aus.

In der Fig. 4 ist ein zweites Ausführungsbeispiel der Mikropumpe dargestellt, deren Pumpkammer 3 in dem Element 11 durch einen anisotropen Ätzschritt festgelegt ist und eine pyramidenstumpfförmige Geometrie aufweist. Das Element 11 ist auf der Seite 13 mittels der als Membran 7 dienenden Folie 15, die auf dem Element 11 befestigt ist, verschlossen.

Das in Fig. 5 gezeigte dritte Ausführungsbeispiel der Mikropumpe unterscheidet sich von dem vorhergehenden insoweit, daß die Pumpkammer 3 durch das modifizierte Element 11a anstelle des Elementes 11 ein geringeres Totvolumen aufweist. Das Element 11a enthält zwei Teilstrukturen 17 und 18 mit unterschiedlich großer Querschnittsfläche, deren einander zugewandte Stirnflächen innerhalb des Elementes 11a teilweise zusammenfallen, wobei die größere Teilstruktur 17 mit der Membran 7 und die kleinere Teilstruktur 18 mit dem die dynamischen Mikroventile 5 enthaltenden Wafer 6 in direkter Verbindung steht. Das Element 11a kann zum Beispiel dadurch hergestellt werden, daß nach einer Doppelseitenlithographie mit jeweils unterschiedlicher Maskengröße ein anisotroper Ätzprozeß von den Seiten 12 und 13 her soweit voranschreitet, bis sich die Ätzfronten treffen.

Fig. 6 zeigt ein viertes Ausführungsbeispiel der Mikropumpe, welches dem vorhergehenden in der relativen Verringerung des Totvolumens der Pumpkammer 3 entspricht. Die Pumpkammer 3 ist durch das Teilelement 11b, welches einen Durchbruch mit einer größeren Querschnittsfläche enthält, und das Teilelement 11c, welches einen Durchbruch mit einer kleineren Querschnittsfläche enthält, anstelle des Elementes 11a festgelegt, wobei das Teilelement 11b mit der Membran 7 und das Teilelement 11c mit dem Wafer 6 in Verbindung steht und beide Teilelemente 11b und 11c an einer Fügefläche 19 fest miteinander verbunden sind.

In dem in Fig. 7 dargestellten fünften Ausführungsbeispiel der Mikropumpe ist die Antriebsvorrichtung 4 durch die Membran 7 und ein Piezoelement 9 festgelegt, wobei das Piezoelement 9 auf der Membran 7 angeordnet ist und mit dieser eine Bimorph-Struktur bildet. Das Piezoelement 9 ist entweder ein Piezoplättchen, wel-

ches auf der Membran 7 zum Beispiel durch eine Klebeverbindung befestigt ist, oder in der integrierten Form um eine mit bekannten Mikrotechnologien physikalisch-chemisch auf der Membran 7 abgeschiedene und nachfolgend strukturierte piezoelektrisch aktive Schicht.

zugewandten Seite der Pumpkammer (3).

9. Mikropumpe nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die dynamischen Mikroventile (5) in <100>-Silizium mittels Photolithographie und anisotropen Tiefenätzens hergestellt sind, wobei der Materialabtrag jeweils nur von einer Richtung und durch den Wafer (6) hindurch erfolgt und jeweils zwei gegenüberliegende der die dynamischen Mikroventile (5) begrenzenden <111>-Flächen miteinander einen Winkel von ca. 70° einschließen.

10. Mikropumpe nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die dynamischen Mikroventile (5) antiparallel auf dem Wafer (6) angeordnet und durch Doppelseitenphotolithographie mit anschließendem gleichzeitigen anisotropen Ätzen aller dynamischen Mikroventile (5) hergestellt sind.

11. Mikropumpe nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Querschnittsflächen der dynamischen Mikroventile (5) an ihren engsten Stellen laterale Abmessungen zwischen einem Mikrometer und fünfhundert Mikrometer aufweisen und die Ausdehnung der dynamischen Mikroventile (5) entlang der Symmetrieachsen (14) zwischen zehn Mikrometer und einem Millimeter betragen.

12. Mikropumpe nach Anspruch 1 oder 4, dadurch gekennzeichnet, daß das die Pumpkammer (3) festlegende Element (10, 11, 11a, 11b, 11c) durch Photolithographie und Ätzprozesse in einem Halbleitermaterial oder in Glas erzeugt ist.

13. Mikropumpe nach Anspruch 1 und 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Membran (7) elektrostatisch, elektromagnetisch, piezoelektrisch oder pneumatisch dargestellt angetrieben wird, daß sie eine schwingende Biegebewegung (16) ausführt.

14. Mikropumpe nach Anspruch 1 und 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Membran (7) und das die Pumpkammer (3) festlegende Element (10) aus einem Stück hergestellt sind.

15. Mikropumpe nach Anspruch 1 und 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Membran (7) aus einem dünnen Material oder einer Folie (15) besteht, welche durch ein Fügeverfahren auf das die Pumpkammer (3) festlegende Element (11, 11a, 11b) aufgebracht ist.

16. Mikropumpe nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, daß das die Pumpkammer (3) festlegende Element (11, 11a, 11b) aus Silizium und die Folie (15) aus Glas besteht und beide durch anodisches Bonden miteinander verbunden sind.

17. Mikropumpe nach einem der Ansprüche 13 bis 15, dadurch gekennzeichnet, daß die Membran (7) durch ein Piezoelement (9) angetrieben wird, welches auf der Membran (7) angeordnet ist und mit dieser eine Bimorph-Struktur bildet.

18. Mikropumpe nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Ausdehnung der Membran (7) in ihrer Fläche zwischen fünfhundert Mikrometer und zwanzig Millimeter beträgt und die Dicke der Membran (7) zwischen einem Mikrometer und einem Millimeter beträgt.

19. Mikropumpe nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Pumpkammer (3) senkrecht zu dem Wafer (6) eine minimale Höhe zwischen zehn Mikrometer und fünf Millimeter hat.

20. Mikropumpe nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Antriebsvorrichtung (4) mit einer Frequenz zwischen einhundert Hertz und

### Patentansprüche

1. Mikropumpe, insbesondere für zu pumpende Gase und Flüssigkeiten, mit einer Antriebsvorrichtung (4), mit wenigstens einem Element (10, 11, 11a, 11b, 11c), auf das eine periodische Druck- und Volumenänderung durch die Antriebsvorrichtung (4) aufprägbar ist, und mit einem auf der Antriebsvorrichtung (4) abgewandten Seite (12) des Elements (10, 11, 11a, 11b, 11c) angeordneten Wafer (6), dadurch gekennzeichnet, daß das Element (10, 11, 11a, 11b, 11c) eine zur Antriebsvorrichtung (4) hin geschlossene Pumpkammer (3) aufweist und der Wafer (6) wenigstens zwei dynamische Mikroventile (5) hat, wobei sich der Querschnitt wenigstens eines dynamischen Mikroventils (5) zum Element (10, 11, 11a, 11b, 11c) hin verjüngt und sich der Querschnitt wenigstens eines dynamischen Mikroventils (5) zum Element (10, 11, 11a, 11b, 11c) hin vergrößert und die wenigstens zwei dynamischen Mikroventile (5) in direkter Verbindung mit der im Element (10, 11, 11a, 11b, 11c) vorgesehenen Pumpkammer (3) stehen.
2. Mikropumpe nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die dynamischen Mikroventile (5) eine pyramidenstumpfförmige Gestalt aufweisen.
3. Mikropumpe nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die pyramidenstumpfförmigen dynamischen Mikroventile (5) einen quadratischen oder rechteckigen Querschnitt aufweisen.
4. Mikropumpe nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das die Pumpkammer (3) festlegende Element (10, 11, 11a, 11c) auf einer der Antriebsvorrichtung (4) abgewandten Seite (12) offen ist und durch die Befestigung des die dynamischen Mikroventile (5) enthaltenden Wafers (6) auf diesem Element (10, 11, 11a, 11c) verschlossen wird.
5. Mikropumpe nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Antriebsvorrichtung (4) eine Membran (7), welche die Pumpkammer (3) auf einer dem Wafer (6) abgewandten Seite abschließt, enthält.
6. Mikropumpe nach Anspruch 1 und 5, dadurch gekennzeichnet, daß die dynamischen Mikroventile (5) gegenüber der Membran (7) angeordnet sind und ihre Symmetrieachsen (14) senkrecht zur Oberfläche der Membran (7) verlaufen.
7. Mikropumpe nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Pumpkammer (3) durch ein mehrteiliges Element (11b, 11c) dargestellt festgelegt ist, daß der Querschnitt der Pumpkammer (3) auf der dem Wafer (6) zugewandten Seite der Pumpkammer (3) geringer ist als auf der Antriebsvorrichtung (4) zugewandten Seite der Pumpkammer (3).
8. Mikropumpe nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das die Pumpkammer (3) festlegende Element (11a) mindestens zwei Teilstrukturen (17, 18) unterschiedlicher Größe enthält, so daß der Querschnitt der Pumpkammer (3) auf der dem Wafer (6) zugewandten Seite der Pumpkammer (3) geringer ist als auf der Antriebsvorrichtung (4)

zwanzig Kilohertz ansteuerbar ist.

Hierzu 3 Seite(n) Zeichnungen

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

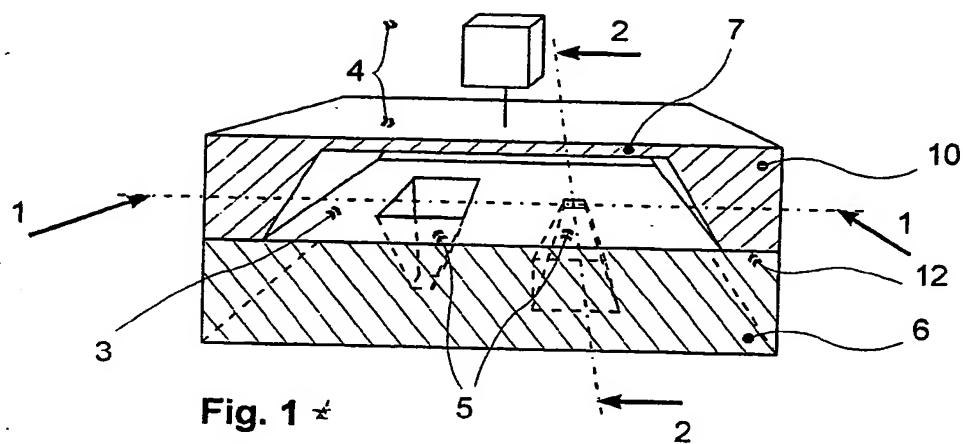


Fig. 1 \*

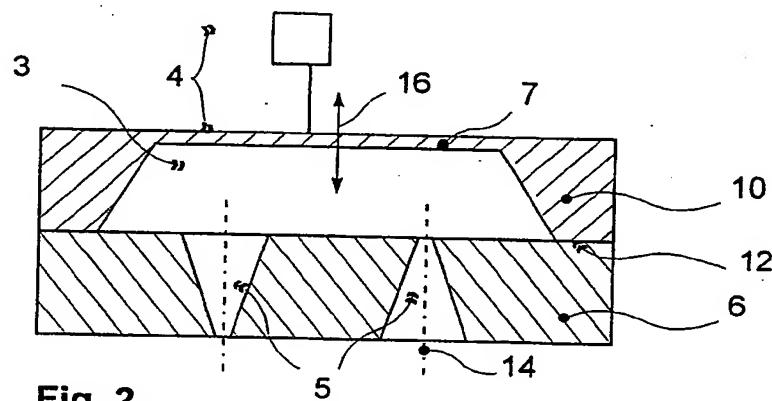


Fig. 2

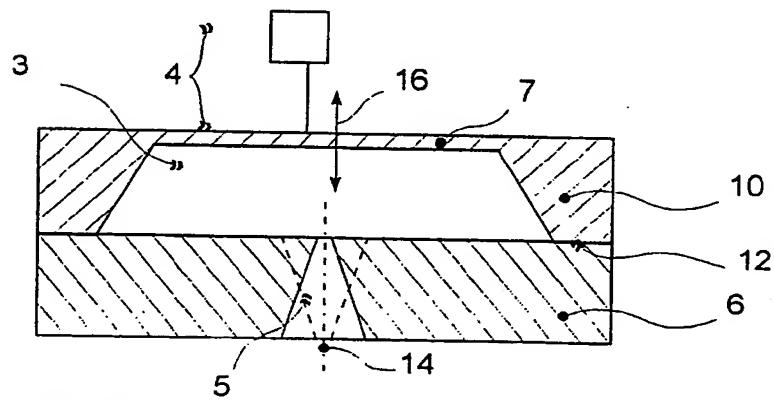


Fig. 3

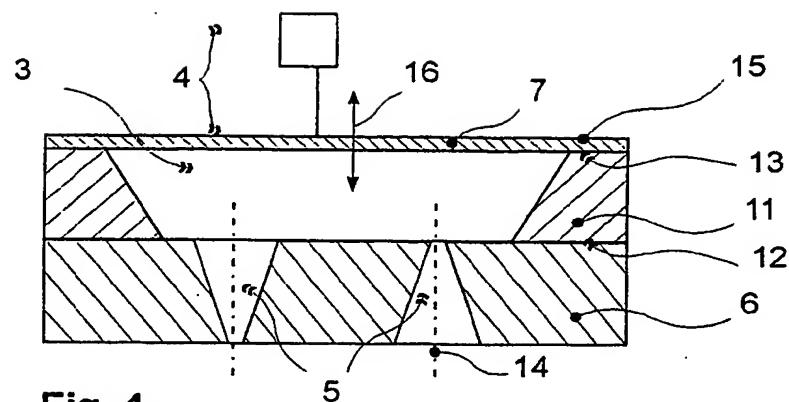


Fig. 4

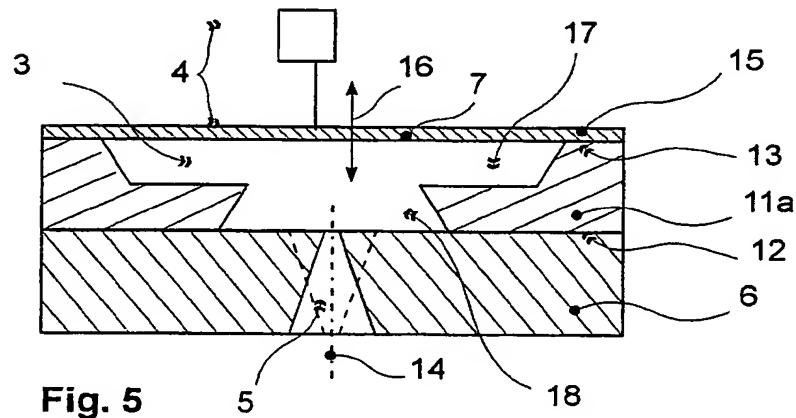


Fig. 5

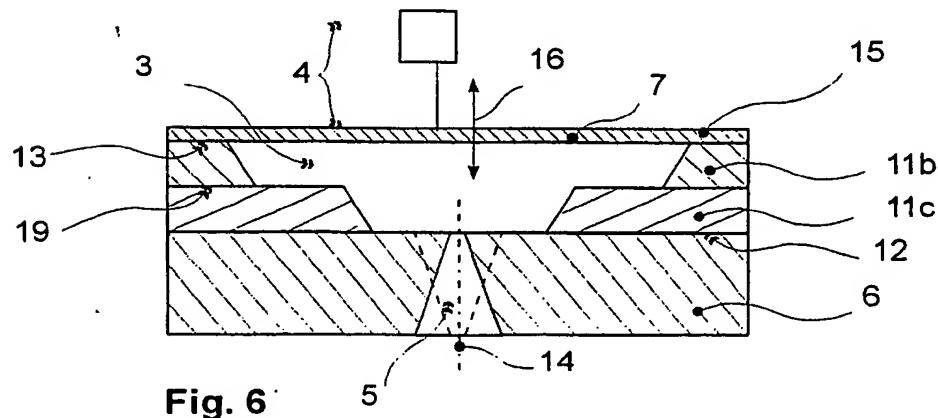


Fig. 6

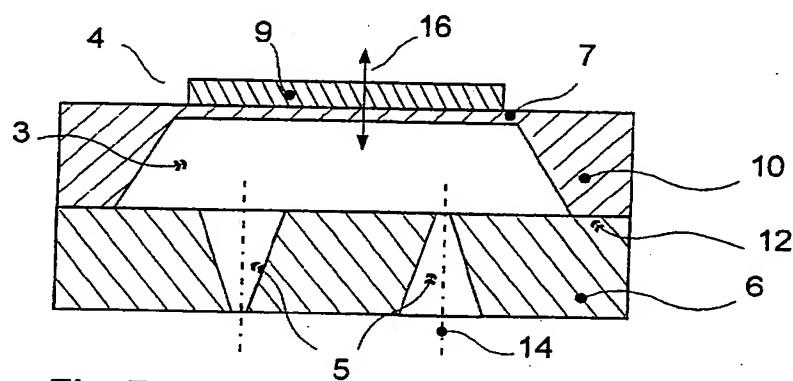


Fig. 7